

3차원 광정보 취득 및 재생 기술

최기홍, 민성욱
경희대학교

요 약

3차원 영상의 촬영 및 재생은 마치 우리에게 카메라와 텔레비전의 존재가 지극히 당연한 것처럼 낯설지 않은 주제가 되었다. 3차원 영화에 대한 시장의 본격적인 반응이 시작된 지도 거의 10년이 돼가고, 최근 몇 년 사이에는 가상/증강현실에 관한 기술이 빠르게 대중화되고 있다. 이런 흐름 속에서 3차원 광정보 처리 기술 개발의 다음 행선지는 어디인지, 그리고 그 다음은 어디인지를 심사숙고하고 관련 연구를 착실히 수행해 나갈 필요가 있다. 1장에서는 3차원 광정보 취득 및 재생 기술의 현황, 2장에서는 차세대로 불릴 만한 기술들을 서술한다. 그리고 3장 이후로는 여러가지 기술 중, 궁극의 3차원 정보 처리로 일컬어지는 홀로그래피 기술에 대해 서술한다.

I. 들어가는 말

최근 정보광학 분야와 VR/AR 기술의 발전에 힘입어 3차원 (three-dimensional, 3D) 영상의 취득 및 재생 기술도 나날이 개선되고, 점차 대중의 품으로 파고들고 있다. 지난 100년간 인간의 눈은 2차원 평면 상에서 재생되는 영상에만 머물렀지만, 정보는 더 이상 평면적으로 재생되지 않고 입체성을 갖게 될 것이다. 이는 정보가 이전보다 더 실감나게 표현된다는 측면에서도 나아가 가치가 있는 방향이지만, 단순히 실감나고 재미나는 볼거리를 넘어서서, 보다 직관적이고, 효율적인 의사소통을 가능하게 한다는 점에서 미래 사회를 상징하는 기술의 필수적인 이정표라 볼 수 있다.

3차원 정보 처리 기술은 우리가 살고있는 지금 이 시대에도 생활 곳곳에 점차 자리를 잡고 있다. 가장 널리 알려진 예로, 2009년에 개봉해 상상 속 세계에 대한 환상적인 영상미와 실감나는 3차원 연출로 대중의 이목을 끈 영화, ‘아바타’가 있다. 그 전에도 3차원 영상물이 존재하지 않았던 것은 아니지만, 평면 정보의 3차원화에 대한 대중의 갈망을 한층 끌어올린 기념비적

작품이라는데는 대부분 동의할 것이다. 영화 ‘아바타’의 개봉 이후 블록버스터 영화들은 줄곧 3차원 영상으로도 제작되고, 고품질의 3차원 프로젝션 시스템을 갖춘 상영관들이 도시 곳곳 영화관에 들어선 것을 독자 여러분들도 잘 알고 계실 것이다. 그리고, 대중들에게 보다 더 실감나는 영상을 제공하기 위해 영화계의 요구에 발맞춰 학계에서는 보다 자연스러운 3차원 영상 전달을 위해, 관련 취득 기술에 관한 연구와, 가상으로 재생되는 3차원 정보에 대한 인간의 인지반응 연구 등이 더욱 활발해졌다.

약 2년 전부터는 3차원 정보가 더욱 개인적인 영역으로 들어오게 됐다. 가상현실(Virtual reality, VR) 및 증강현실(Augmented reality, AR) 기기들이 속속들이 대중화를 선언하며 시장에 출시됐고, 대중의 반응은 그 어느 때보다 뜨겁다. 오쿨러스, HTC vive, Playstation VR 등 전통적인 방식의 VR기기들과, 도전 정신이 빛났던 Google glass, 완전히 새로운 사용자 경험을 선사하는 마이크로소프트의 Hololens 등의 AR기기들이 주목을 받으며 업계와 학계에 동력을 불어넣고 있다.

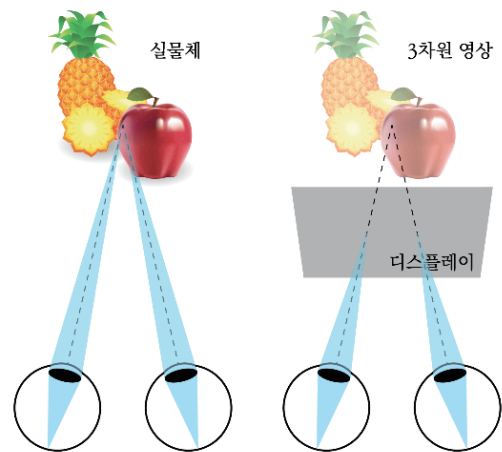


그림 1. 실물체(좌측)와 안경식 양안시차 방식 디스플레이의 영상(우측)을 바라볼 때의, accommodation, vergence의 차이. 3차원 디스플레이를 바라볼 때, accommodation-vergence 간의 불일치가 일어난다.

지금까지 언급된 사례들은 주로 사람의 양 눈에 서로 다른 시차를 갖는 (양안시차) 이미지를 전달해 뇌에서 입체감각이 발현되도록 하는 비교적 단순하고 쉬운 기술들이 응용된 것이다. 양안시차 방식의 3차원 정보는 취득, 전송, 그리고 재생이 매우 쉽다는 장점을 갖고 있고, 따라서 요구되는 카메라와 디스플레이의 고정밀 기술, 그리고 정보 전달 속도가 현 세대의 그것들로 충분하다. 하지만, 양안시차 방식 취득 및 재생 기술은 1) 취득된 영상의 깊이감이 실제의 그것과 대응되지 않는다는 점, 2) 서로 다른 시차가 양안으로 각각 전달되기 위해서는 안경이나 두 개의 디스플레이 등 사람이 무언가를 착용해야 한다는 점, 3) 안구 내 렌즈인 수정체가 초점을 맺는 위치와 두 안구의 광축이 수렴하는 위치가 차이가 나서 시정피로도가 크다는 점 (accommodation-vergence conflict, <그림 1>참고)에서, 지금은 더욱 자연스럽고 정보량이 풍부한 차세대 3차원 기술개발의 결실이 필요한 시점이다 [1][2][3].

II. 차세대 3차원 광정보 취득 및 재생 시스템

차세대 3차원 광정보 처리 기술은 각각 취득 및 재생 기법을 모두 아우르고 있다. 전반적인 기술의 개요는 <그림 2>에 정리돼있다. 먼저 소개할 집적영상시스템은 렌즈가 평면적으로 배열된 렌즈어레이를 이용해, 하나의 촬상면에 렌즈의 개수만큼의 시차 정보를 모두 담고, 하나의 디스플레이에 이를 다시 재생해 공간 상에 광선들의 분포(Light-field, LF)로 시청자가 안경을 착용하지 않고도 취득된 물체의 광학상을 바라볼 수 있게 하는 기술이다. 사실 이 기술은 차세대라 분류되기에는 그 역사가 100여년 전으로 거슬러 올라가지만[4], 고해상도 평판 디스플레이, 정밀 렌즈어레이 제작기술 등이 21세기로 접어들고 서야 비약적으로 발전했기 때문에 주목받는 차세대 3차원 기술 중 하나로 손꼽힌다. 집적영상법의 응용된 형태는 시스템 앞에 부양렌즈를 두어서 깊이감을 더욱 향상시킨 집적부양시스템[5], 혹은 1차원으로 렌즈가 배열된 lenticular sheet를 활용해 상하 시차를 포기하는 대신 공간 해상도를 더욱 높인 멀티뷰(multi-view)디스플레이 등이 있다[6][7]. 한편, 렌즈어레이를 활용하지는 않지만, 양안시차정보 제공을 위해 광선의 지향성을 부여한다는 측면에서 비슷한 범주로 볼 수 있는 텐서(tensor) 디스플레이가 있다[8]. 이는 평판 디스플레이 패널을 일정 간격으로 적층시키고 뒷편에 있는 패널을 이용해 백라이트 광원에 지향성을 부여하는 방식으로 입체영상을 표시한다.

이 기술들의 강점은, 1) 양안시차 방식으로 취득된 정보의 양보다 더욱 풍부한 깊이 정보(상하좌우 시차 포함)를 가지고 있으면서도, 홀로그래피에서 요구되는 정보량에 비해서는 현저히 그 양이 적어 현재의 정보통신 기술로도 상당 부분 감당이 가능하다는 점, 2) 시청을 위해 사람이 착용해야 하는 도구가 없다는 점, 3) 일반 카메라와 평판 디스플레이를 이용해 취득 및 재생을 하기 때문에 선천적으로 빨강, 초록, 파랑(RGB)의 빛의 3원색 표현이 가능하다는 점이다. 또한 정보처리에 있어 plenoptic function 혹은 Lumigraph[9], [10]라 불리는 5변수 행렬(공간 좌표와 밝기정보가 포함)의 선형적 처리가 대다수를 차지하기 때문에, 현재의 컴퓨팅 기술로 충분히 실시간 영상 재생이 가능하기도 하다. 'Light-field'라는 용어는 이 기술에서 취득하고 재생하는 광선의 분포 정보를 칭하기도 하지만, 이 세부기술을 포괄하는 시스템을 칭하는 용어로도 사용된다.

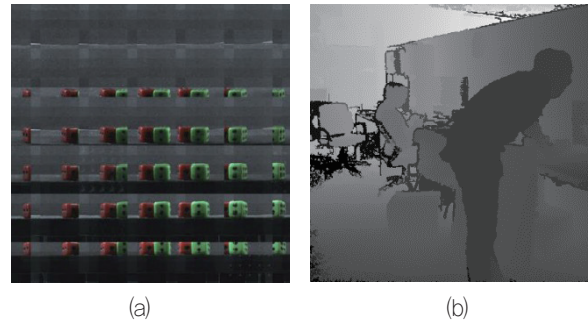


그림 2 (a) Light-field 이미지, (b) 뎁스맵 이미지

다음으로, 3차원 광 정보를 취득해 일반 RGB이미지와 함께, 평면으로 표현된 뎁스맵(depth-map)으로 나타내고, 이를 적층형 디스플레이로 재생하는 기술이 있다. 이러한 취득 기술을 뎁스오브필드 (Depth of Field, DoF) 이미징이라 하고, 재생을 위한 적층형 디스플레이 시스템을 큰 범주에서 부피형(volumetric) 디스플레이로 칭한다. 뎁스맵이란, 한 시점에서 공간의 분포를 가장 가까운 부분은 흐니 색으로, 가장 먼 부분은 검정색으로 나타내고, 그 사이의 분포를 일정 범위의 계조(grayscale) 단위로 나타낸 흑백의 그림이다. 여기서, 어둡고 밝은 부분은 각 취득 장비나 컴퓨터 프로그램에 따라 역전될 수도 있다. 일반적으로 다뤄지는 8비트 이미지로 뎁스맵이 저장되면, 이는 시점에서 보이는 공간의 깊이를 1부터 256까지의 숫자로 표현한 지도인 셈이다. 이러한 뎁스맵은 여러가지 방법으로 얻어질 수 있는데, 많이 알려진 제품으로는 마이크로소프트의 Kinect [11]가 있다. 또한 ToF(time of flight) 카메라나, 구조광(structured light) 프로젝션 시스템을 흔히 사용하기도 한다. 취득 방법은 적외선이나 구조광을 투사해야 하는 시

시스템, 프로젝션 매핑이 된 3차원 공간을 취득하는 시스템, 그리고 취득된 공간 정보를 맵스맵으로 변환하는 과정으로 크게 나누며, 이는 스테레오 카메라나, 집적영상법에 비해 시스템적으로 복잡하지만, 최종적으로 얻어진 정보는 단순한 형태이기 때문에, 이후의 처리속도나 방법 면에서 매우 수월하다는 장점이 있다. 본 연구실은 이렇게 얻어진 맵스맵 이미지를 빛의 편광상태를 이용해 다층의 스크린에 재생하는 부피재생방식 디스플레이를 제안한 바 있다[12]. 이렇게 재생된 3차원 정보는 물리적으로 다층으로 표현된 공간 상에 존재하기 때문에, 아무런 장비의 도움 없이 3차원 정보를 접할 수 있다. 한편, 사용되는 스크린의 개수는 적층으로 인한 불투명도와, 프로젝션 시스템의 초당 프레임 재생 속도의 한계 때문에 그 개수와 간격의 자유도가 떨어지고, 따라서 소수의 스크린으로 효율적인 3차원 정보 표현하고자 깊이 융합 디스플레이 (Depth-fused Display, DFD) 시스템이 제안됐다[13]. DFD 시스템은 각 깊이 정보를 한 스크린이 아닌 여러 스크린에서 일정 비율로 나눠 재생해 시청자로부터 상이 스크린이 아닌 스크린 사이 어딘가에 떠있다고 착각하게 만드는 기술로, 적층형 디스플레이에서의 스크린 개수의 한계와 이로 인한 깊이감의 이산화 현상을 일정 부분 해소한다.

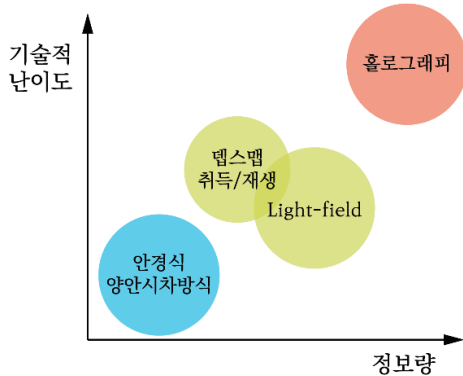


그림 3. 대표적인 3차원 광정보 취득 및 재생 기술의 구현 난이도와 정보량에 따른 분류

언급된 3차원 정보 취득 및 재생 기술의 구현 난이도, 다뤄지는 정보량은, 간단하지만 한계가 많은 양안시차 방식과, 복잡하지만 궁극적인 홀로그래피 기술 사이의 어딘가에 위치하고 있다 <그림 3>. 그리고 당장이라도 실현 가능한 기술과, 요원하나 궁극적인 이상 사이의 어느 지점에서 여러가지 타협과 대안을 충실히 제시하고 있다. 이러한 점에서 대중화의 가능성을 접쳐볼 때, 향후 등장할 3차원 광정보 취득 및 재생 분야에는 대체로 앞서 언급된 키워드들이 나타날 가능성이 높다. 하지만,

전자공학 및 정보통신 역사의 지난 반백년의 눈부신 성과를 돌이켜 볼 때, 취득 및 재생 소자의 발전 가능성은 아직 그 한계를 알 수 없고, 모든게 다 파헤쳐진듯한 상황에서도 새로운 것들이 나타나는 이 시대에, 홀로그래피 기술의 무궁무진한 발전 가능성에도 독자들은 많은 관심을 가지고 학계의 동향을 주목할 필요가 있다고 생각한다.

III. 홀로그래피 개요

홀로그래피는 1948년 헝가리계 영국인 전기 공학자, Dennis Gabor에 의해 처음 그 원리가 등장했다. 흔히 이야기하는 홀로그래피 기술은 주로 재생의 측면을 염두에 두지만, 사실 세상에 처음 나온 홀로그래피 기술은 취득에 관한, 그것도 현미경에서의 3차원 이미지 취득에 관한 방법이었다. <그림 4>는 Gabor의 홀로그래피 원리에 입각해 기초적인 홀로그래피 기록 및 재생 기술을 나타낸 것이다.

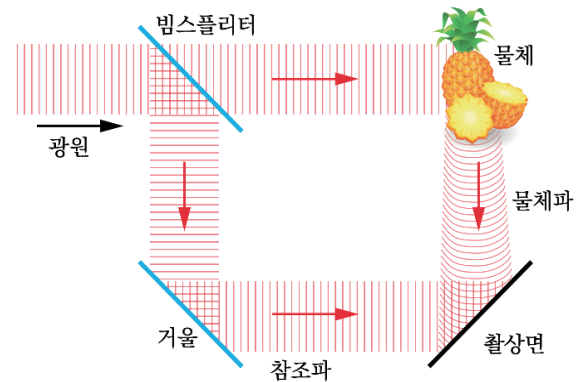


그림 4. Gabor 홀로그래피 취득 원리

홀로그래피가 궁극의 3차원 광정보 처리 기술로 흔히 불리는 이유는, 앞서 언급된 모든 기술 중 파면을 기록하고 재생하는 유일한 기술이기 때문이다. 정보처리 속도와 분석의 용이성 때문에 대부분의 3차원 기술은 기하광학적 접근법을 근간으로 삼고 있지만, 사실 우리의 눈이 바라보는 빛의 성질은 광선 보다는 파동으로 해석해야 회절, 수차 등의 현상을 더욱 정확히 이해하고 이에 대한 고려를 시스템에 반영할 수 있다. 문제는 파면의 정보를 얻기 위해 진폭(amplitude)와 더불어 위상(phase)을 어떻게 기록할 수 있는지에 관한 것인데, 이는 간섭계를 통해 구현할 수 있다. 19세기 후반에는 이미 지금도 많이 사용하는 간섭계인 마하-젠더 간섭계(Mach-Zehnder interferometer)가 발표되었

다. 이후 개발된 Gabor 홀로그래피 취득 시스템 역시 빛의 파면 정보를 기록하기 위한 수단으로 마하-젠더 간섭계의 형태를 취한 것을 <그림 4>에서 볼 수 있다.

간섭계를 통한 광정보 취득을 위해선, 취득하고자 하는 물체의 광정보를 담은 파와, 이 파와 간섭을 일으킬 파가 각각 필요하다. 일반적으로 전자를 물체파(object wave), 후자를 참조파(reference wave)라 부른다. 간섭은 파장대가 일치하고, 상호 가간섭성(mutual coherence)이 있는 상태에서 일어나기 때문에, 광원은 하나를 설치하고, 이를 빔스플리터(Beam splitter, BS)를 이용해 두 광정보 채널로 나누어 하나는 물체파로, 하나는 참조파로 사용하는 방법을 사용한다. 참조파는 공간을 가로질러 촬상면에 그대로 도달하는 반면, 물체파는 물체에 반사되거나 투과되면서 파면의 왜곡이 발생한 채로 촬상면에 도달한다. 촬상면 상에서 두 파는 간섭을 일으키고, 회절무늬(diffraction pattern / fringe pattern)를 기록하게 된다. 이 참조파와 물체파가 간섭을 일으킨 회절무늬는 마치 라디오 통신에서 반송파(carrier wave)에 실린 음성정보(signal)로 유비될 수도 있다.

간섭의 조건은, 간섭의 주체가 되는 두 파의 광경로 차가 가간섭거리 보다 짧아야 한다. 가간섭거리는 통상 로 정의되고, 여기서 는 광원의 스펙트럼폭(spectral width)이다. 레이저의 경우 단일 파장 광원으로 보아도 무방하며, 가 매우 작기 때문에 가간섭거리가 매우 긴 반면, LED의 경우 가 수십나노미터로, 가간섭거리가 수~수십마이크로미터로 짧다. 일상적으로 자연광의 간섭현상을 보기 힘든 이유도 이 대목에서 알 수 있다. 간섭은 두 파면이 촬상면에 도달해서 일어나게 되며, 간섭의 결과는 다음의 수식으로 설명된다.

$$I = |\psi_o + \psi_r|^2 = |\psi_o|^2 + |\psi_r|^2 + \psi_o\psi_r^* + \psi_o^*\psi_r \quad \text{식 1}$$

여기서 ψ_o 와 ψ_r 은 각각 물체파, 참조파를 의미하며, 위첨자의 *표시는 conjugation이다.

홀로그래피 정보를 담고 있는 매체는 포토폴리머 필름 같은 촬상면 그 자체 일수도 있고, Charge-coupled device (CCD) 나 포토다이오드(Photo-diode, PD)를 이용해 기록된 전자정보 일수도 있다. 전자의 경우에는 취득에 사용한 참조광을 다시 사용해 공간 상에 물체의 광정보를 복원할 수 있고, 후자의 경우에는 컴퓨터 상에서 수치적 복원 과정을 거치거나, 공간광변조기(Spatial light modulator, SLM)에 이미지를 띄우고 소자 표면에 참조광을 투사해 공간 상에 복원할 수도 있다. 특히 컴퓨터 연산 처리 과정을 거치게 되는 경우 아날로그 정보가 촬상면

에서 디지털화 되기 때문에, 이러한 취득 및 재생 과정을 디지털 홀로그래피(Digital holography, DH) 기술로 별도로 분류해 부르기도 한다. 그리고, 이에 비한 전자의 경우는 아날로그 홀로그래피로 부른다. 이와 같이 물체파에 의해 왜곡된 파면의 정보가 소자에 기록됐거나, 재생되기 때문에, 이 소자를 거친 참조광은 다시 물체의 광정보를 표현할 수 있고, 이에 대해 안구와 뇌는 다른 3차원 광정보 처리 기법으로 재생되는 상에 비해 더 현실감 있는 깊이 지각을 하게 된다.

한편, 식 1에서 나타난 것처럼, 촬상면에 기록된 물체의 광정보에는 세 항이 존재하는데 (Gabor 홀로그래피의 경우), 이를 재생하게 되면 각각 DC성분, 실상, 허상의 이미지로 나타나게 된다. 따라서 이들을 분리해 표현하기 위해 취득의 과정에서 비근축 셋업을 해 세 항의 성분을 공간적으로 나눠 기록하는 등의 해결책을 사용한다. 근축 셋업을 이용한 기록 시스템의 경우에는 세 항이 공간적으로 겹쳐져 나타나 효과적으로 분리할 방법이 존재하지 않았는데, 디지털 홀로그래피의 발전과 더불어 제안된 phase shifting 방법을 이용하면 세 항 중에서 우리가 원하는 실상에 관한 항을 남기고 나머지를 제거할 수 있다[14]. 이 방법을 구현하기 위해서는 물체파나 참조파에 이들보다 작은 거리만큼의 광경로 차이를 만들어내야 한다. 일반적으로 마하-젠더 간섭계에서 하나의 거울을 피에조(Piezo)-트랜스듀서를 이용해 움직이며 광경로 차를 만들어 내며, 뒷 장에 설명할 시스템의 경우에는 광경로 차이를 만들기 위해 위상변조 SLM을 사용한다. Phase shifting을 위한 위상 차이는 보통 3~4단계로 나뉘어 진다. 예를 들어, 3번 위상변조를 부여한다면, 각 단계마다 위상 변조 범위는 120도씩이다. 각 단계마다 기록되는 결과는 각 픽셀에 기록된 밝기(intensity)값의 2차원의 실수 행렬이다. 이를 DC, 허상을 없애고 파면의 물리적 재현이 가능한 복소(complex) 홀로그램으로 만들기 위해서 식 2의 연산을 거친다.

$$CH = h_1(e^{-j\delta_3} - e^{-j\delta_2}) + h_2(e^{-j\delta_2} - e^{-j\delta_3}) + h_3(e^{-j\delta_2} - e^{-j\delta_1}) \quad \text{식 2}$$

여기서 좌항은 연산의 결과로 나타나는 복소 홀로그램이며, δ 는 변조되는 위상값, h 는 각 위상변조에 따라 기록된 실수행렬이다

디지털 홀로그래피 취득 시스템에서 얻어진 홀로그램 이미지는 최종적으로 파면의 진폭과 위상 정보를 담은 복소수 행렬의 형태를 갖게 된다. 이를 공간 상에서 재생하기 위해서는 SLM 등의 광전자소자에 얻어진 데이터를 재생시켜 참조파를 입사시켜야 하는데, 필자가 아는 한 현재 사용되는 광전자소자 중 진폭과 위상 정보를 동시에 재생하는 시스템은 존재하지 않는

다. 따라서 디지털 홀로그래프의 실공간 재생을 위해서는 일반적으로 한 광전자소자에는 진폭 정보를, 다른 광전자소자에는 위상 정보를 재생하고 정밀하게 정렬해 참조파가 두 소자를 모두 거쳐 물체 정보를 재생하도록 해야한다. 이러한 두 재생 소자의 이용은 비용이 비싸고 정렬이 쉽지 않기 때문에, 현재는 하나의 소자로 위상 정보만을 재생하거나, 두 정보가 모두 재생되도록 하는 연구가 진행되고 있다. 한편, 디지털 홀로그래프 이미지는 컴퓨터 상에서 각 깊이에 따른 평면 이미지로도 재생될 수 있는데, 이를 수식적으로 구현하기 위해서는 Fresnel back propagation 과정을 거쳐야 한다[15].

IV. 디지털 홀로그래피 기술 고려사항

디지털 홀로그래피 광정보 취득 및 재생 시스템을 위한 고려사항에는 (세부 구현기술에 따라 다를 수 있지만) 크게 광원, CCD의 해상도와 bit-depth, SLM의 해상도 등이 있다. 광원의 경우, 파장, 밝기, 그리고 가간섭성이 주된 고려사항이 된다. CCD나 SLM에 관한 문제는 결국 2차원 공간 광정보의 샘플링 문제로 치환해 바라볼 수 있다.

광원에 관한 고려사항 중 가간섭성은 홀로그래피 광정보 취득에서 매우 중요한 요소이다. Gabor의 연구가 진행되던 당시에는 가간섭성이 높은 광원이 개발되지 않아 세간의 이목을 끈 홀로그래피 기술은 즉시 정체를 맞게 된다. 하지만, 1960년대 레이저라는 단일 파장의, 가간섭거리가 매우 긴 광원이 발명되면서, 홀로그래피 연구개발도 본격적으로 새 국면에 접어들었다[16][17]. 레이저를 사용하는 홀로그래피 시스템들은 간섭 효율이나 광손실의 측면에서 상당한 자유도를 갖고 있지만, 레이저의 고주파 성분들에 의해 발생하는 자잘한 무늬(speckle pattern)로 인한 이미지 품질 저하 문제, 외부의 미세한 진동에 의해 결과물의 편차가 심하게 발생하는 문제를 갖고 있다. Light emitting diode (LED) 기술이 성숙기에 접어들면서, 레이저 광원 사용시 나타나는 문제점들을 해소하고자, 이를 광원으로 활용한 홀로그래피 광정보 취득 시스템이나, 매우 낮은 가간섭성의 광원을 사용할 수 있는 - 미생물 시료에서 나오는 형광, 또는 바깥의 자연광 정보 까지도 취득 가능한 - 홀로그래피 기술도 속속 발표되고 있다.

CCD 픽셀의 집적도는 홀로그래피 패턴 기록에 매우 중요한 요소이다. 잠시 이론적인 이야기를 통해 이를 설명하겠다. 근사 회절이론은 크게 프라운호퍼(Fraunhofer)와 프레넬(Fresnel) 회절 이론으로 나뉜다. 두 회절이론은 모두 단일 파장의 2차원 파면정보가 자유공간을 z 의 거리만큼 이동했을 때 어떻게 변하

는지를 서술한다. 각 회절이론의 적용 범위는 빛의 전파거리에 따라 나뉘며, 일반적으로 홀로그래피 시스템을 취급할 때는 전파거리가 보통 1 미터 이내이기 때문에, 프레넬 근사를 많이 사용한다. <그림 5>와 같은 상황에서, $U(\xi, \eta)$ 라는 파면이 z 만큼 전파한 프레넬 회절의 결과인 $U(x, y)$ 는 식 5를 따른다.

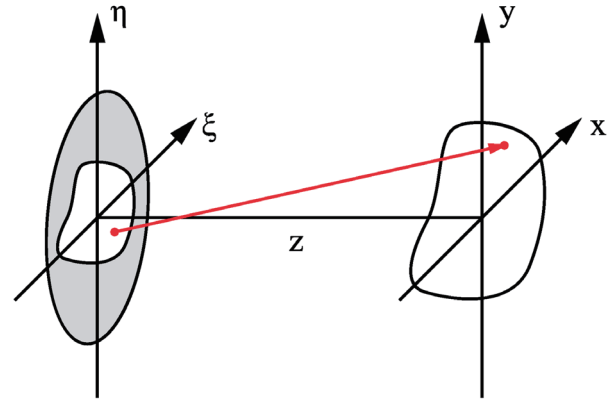


그림 5. Fresnel integral 도식

$$U(x, y) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} \iint_{-\infty}^{\infty} U(\xi, \eta) \exp\left\{j \frac{k}{2z} [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]\right\} d\xi d\eta \quad \text{식 3}$$

식 3에서, ξ, η 는 회절 전의 공간좌표, x 와 y 는 거리 z 만큼 이동한 파면의 공간좌표이다. k 는 파수로, $2\pi/\lambda$, λ 는 빛의 파장이다. 적분의 결과로 진폭이 공간에 따라 변조되는 파면 정보에 관한 식이 나오는데, 진폭의 변조 주기는 광축에서 멀어질수록 제곱으로 커진다. 다시 홀로그래피에서의 상황으로 돌아와, CCD를 이용해 이 파면을 기록하는 상황을 가정할 때, 광축에서 가장 멀리 떨어진 부분에서 빠르게 변조되는 진폭의 변화를 모두 온전히 기록할 수 있으면 이 홀로그래피 취득 시스템은 파면을 충실하게 기록했다고 볼 수 있다. 하지만 픽셀 집적의 한계가 있기 때문에, 픽셀의 공간주파수보다 더 큰 주기로 변조되는 성분들은 충실한 기록이 어렵게 되고, 에일리어싱(aliasing) 현상이 나타난다. 즉, 디지털 홀로그래피 취득 시, 나이퀴스트(Nyquist) 주파수는 CCD의 픽셀 크기에 의해 결정되며, 에일리어싱 현상을 최대한 억제하기 위해서는 따라서 고해상도, 고집적도를 가지는 CCD를 선택해야 한다. <그림 6>은 에일리어싱 현상을 일차원으로 도식화 한 것이다.

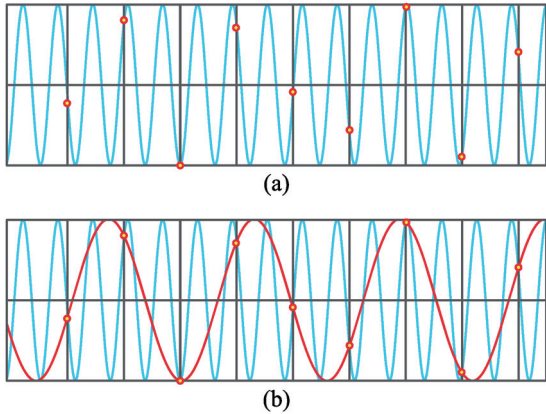


그림 6. (a)와 같이 본래 하늘색의 본래 파형에 대해 충분하지 못한 샘플을 채취해 이를 바탕으로 원래의 파형을 복원하려 하면 (b)의 빨간색 파형과 같이 원치 않는 파형으로 복원된다. 이를 에일리어싱이라 한다.

비트깊이(bit-depth)는 한 픽셀에 기록되는 빛의 세기를 2의 n 제곱의 단위로 나눌 때의 자연수 n 값을 의미한다. 일반적으로 우리가 접하는 디지털 이미지는 8비트로, 가장 어두운 밝기부터, 가장 밝은 밝기까지의 빛의 세기를 2의 8제곱인 256 단계로 나누어 저장하고 출력한다. 빛의 세기를 256 단계로 표현되는 정보량으로 표현하면 사람의 눈이 자연스러운 밝기 변화를 지각하는 데는 크게 무리가 없지만, 홀로그래피 기록의 경우에는 취득된 광정보에 DC 성분 정보나 노이즈 정보가 상당수 포함되기 마련이어서, 이를 컴퓨터 연산을 통해 억제하거나 제거하기 위해서는 보다 많은 단계의 정보량이 필요하다. 특히 레이저에 비해 가간섭성이 적은 LED나 일반적인 광원을 이용할 때는 유의미한 신호가 DC 정보에 비해 미미하게 기록되기 때문에, CCD의 비트깊이는 더욱 중요해진다. 보통 2의 16제곱인 65536개의 계조를 표현할 수 있는 16비트 이미지로 광정보를 취득하고자 8비트보다 높은 수의 비트깊이값을 갖는 CCD를 사용한다.

SLM은 주로 홀로그래피 재생 시스템에 주되게 활용되지만, 취득 시스템에서도 경우에 따라 파면의 변조를 위해 이용된다. SLM의 해상도가 높을 수록, 혹은 픽셀이 더 조밀하게 집적될 수록, 홀로그래피 취득 시의 변조 효율이나 시야각, 표현 가능한 정보량 등에서 재생 시스템의 시정품질이 개선된다. 또한 위상 변조 SLM의 경우, 위상의 변조가 0도부터 360도까지 선형적으로 제어되어야 범용적인 디지털 연산 처리를 할 수 있다. CCD에서와 마찬가지로 이유로 SLM에 출력하는 디지털 패턴(예로, 간섭패턴, Coded-aperture 등)에 에일리어싱이 일어나지 않도록 하려면 SLM의 픽셀 배열의 공간주파수로 결정되는 나이키스트 주파수가 높아야 한다.

V. 자가간섭 홀로그래피 취득 시스템

본 장에서는 여러가지 홀로그래피 기술 중, 자가간섭/incoherent 홀로그래피 취득 기술에 관해 서술한다.

Incoherent 홀로그래피의 장점은 앞서 언급한 것처럼 레이저를 광원으로 이용한 취득 시스템에서 나타나는 고주파 노이즈를 해소하고, 외부 진동에 상대적으로 덜 취약하다는 점에 있다. 자가간섭의 홀로그래피 취득 시스템의 장점을 소개하기에 앞서, 자가간섭의 개념이 무엇인지, 그리고 자가간섭 시스템이 기존의 마하-젠더 간섭계 기반 시스템에 비해 어떻게 달라지는지에 관해 설명하고자 한다. 마지막으로, 대표적인 자가간섭 홀로그래피 시스템과 관련 문헌을 소개하며 마무리 한다.

자가간섭의 개념을 이해하기 위해서는 빛의 가간섭성에 대한 새로운 면을 살펴봐야 한다. 간섭이 가능하기 위해서는 간섭하는 두 파면의 광경로 차이가 가간섭거리 이하여야 한다. 그리고 이렇게 미세한 차이가 발생하기 위해서는 두 파면은 동일 위상으로 거의 동일한 시간에 광원을 떠나야 한다. 따라서 이 경우의 가간섭 조건은 시간에 관한 것이며, 이 조건을 시간가간섭성(temporal coherence)라 부른다. 한편, 시간가간섭성 조건이 충족되지 않아도, 공간적으로 거의 같은 시간에 같은 위상조건인 파면이 만들어지면, 이 파들은 동일한 광경로를 거쳐와 간섭이 가능하다. 이러한 조건을 공간가간섭성(spatial coherence)이라 부른다. 잘 알려진 공간가간섭성에 의한 간섭무늬의 생성 사례로 우리가 잘 아는, 영의 이중슬릿 실험(Young's double slit experiment)이 있다 (그림 7 참고). 이 실험에서 사용된 광원은 가간섭거리가 길고, 동일한 파장인 레이저가 아닌, 상식적으로 간섭이 불가능한, 그리고 파장의 스펙트럼 분포도 넓은 수은램프이다. 이 광원에서 어느 한 시점에 발생한 파면은 자유 공간을 전파해 하나의 슬릿을 거치며 원통형의 파면으로 회절되고, 다시 전파해 두 개의 슬릿을 동시에 거치며 회절되어 서로 다른 공간에서 동일한 파면을 만들어낸다. 두 파면이 가간섭거리보다 짧은 광경로 차이를 갖고 관찰면에서 만나면 가간섭조건이 성립하므로 간섭무늬를 생성하고, 전파평면에 평행한 방향으로 변조되는 광경로 차에 의해 간섭으로 인한 음영차이를 기록한다. 이렇게 공간가간섭 조건 역시 파면의 진폭과 위상의 정보를 기록할 수 있게 하는 유용한 도구가 된다.

지금까지는 물체에 참조파와 동일한 파면을 통과, 혹은 반사시켜, 그 파면의 왜곡을 간섭무늬로 기록하는 시스템을 간주하고 서술했다. 하지만, 하나의 발광하는 물체점이나, 산란(diffusive)반사특성을 가지는 물체점에서 발생한 구면파를 두 개의 변조 가능한 파면으로 나눌 수 있다면, 이 둘 사이의 공간가간섭성을 이용해 간섭무늬를 기록할 수 있다. 이렇게 나타난

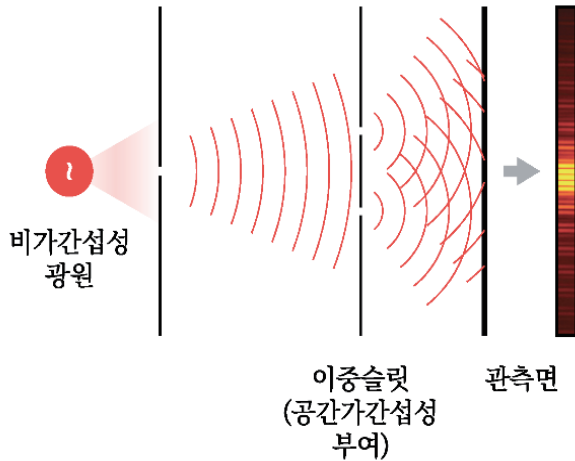


그림 7. 영의 이중슬릿 실험

간섭 현상을 자가간섭이라 부르고, 이를 이용한 홀로그래피 취득 시스템을 자가간섭 시스템이라 부른다. 앞선 시스템에서는 하나의 파면에 물체에 대한 정보가 실려있다면, 자가간섭 시스템에는 나뉘어진 두 파면이 모두 하나의 물체점에 대한 공간정보를 가지고 있다. 인접한 두 물체점에서 각각 발생한 파면이 관찰면에 도달할 때, 광경로 차이가 가간섭거리보다 커지면, 두 파는 간섭을 일으키지 않고 각각 빛의 세기의 중첩된 형태로 이미지로 기록된다. LED 광원의 경우 앞서 언급했듯 가간섭거리가 레이저에 비해 매우 짧기 때문에 이웃한 물체점 간의 간섭은 일어나지 않고, 고해상도로 물체의 광정보로 기록할 수 있다.

이러한 자가간섭의 특성으로, 홀로그래피 취득 시스템이 매우 단순해질 수 있다. 우선, 참조파를 위한 모듈이 별도로 필요가 없기 때문에, 최소한 한 두 가지의 광학 시스템과 고정 장비가 제거되며, 긴 광경로로 인해 참조파와 물체파 각각에 실리는 진동에 의한 광경로 차이가 효과적으로 줄어들어 고성능의 진동 감쇄 장치 없이도 취득의 안정성이 대폭 향상된다. 또한, 물체점으로부터 나온 파면을 같은 공간 내에서 분리해 변조시키면, 마치 우리가 아는 기본적인 현미경의 구조처럼, 하나의 광학채널로 간섭계를 구현해 물체의 홀로그래피 정보를 취득할 수 있다.

대표적인 자가간섭 홀로그래피 취득 시스템이 <그림 8>에 나열돼 있다[18][19]. 대부분 대물렌즈로 취득된 물체파를 2차원 간섭계로 전파시켜 광경로 차이를 만들어내고, 이를 다시 수집해 관찰면으로 보낸다 <그림 8 (b)>의 시스템은 위상 변조 SLM과 선편광판을 이용해 하나의 광학 채널에서 광경로 차이를 만들어내고, 간섭을 일으킨다. <그림 8 (b)>는 Fresnel incoherent correlation holography, 줄여서 FINCH로 부르고 있다. 이에 대해 좀 더 알아보자.

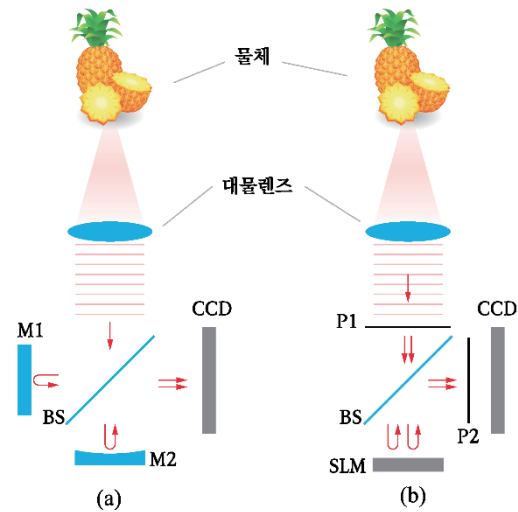


그림 8. 대표적인 자가간섭 홀로그래피 취득 시스템. (a)에서 M1, M2는 거울(mirror)을 의미하며, 각각의 곡률은 다르다. (b)에서 P1, P2는 선편광판을 의미하며, 모두 45도로 정렬돼있다. BS는 빔스플리터를 칭한다.

FINCH는 2007년도에 Joseph Rosen 교수의 그룹에서 처음 고안되고 발표되었다. 이후 꾸준히 간섭의 효율이나 해상도 측면에서 성능이 개선되고[20], 다양한 분석이 이루어졌으며 [21], 여러 응용시스템이 발표되었다[22][23]. 본 연구실에서도 후발주자로 FINCH를 활용한 연구를 진행하고 있다. 기본적인 FINCH 시스템을 구성하기 위해서는, LED 광원, 대물렌즈, 두 개의 선편광판, 위상변조SLM이나 편광선택성이 있는 액정렌즈, 그리고 CCD가 필요하다. 편광선택성 액정렌즈와 마찬가지로 위상변조SLM도 편광선택성이 있으며, 이 소자의 표면에 도달한 파는 특정 편광성분(보통 수직 편광)만이 변조되고, 나머지 성분은 반사된다. 이 특수한 광학소자는 두 선편광판 사이에 위치한다. 선편광판들은 SLM의 변조가능한 편광축에 대해 45도로 정렬해 위치한다. 대물렌즈에 의해 취득된 물체점의 정보는 45도로 정렬된 첫 번째 편광판에 의해 수직 및 수평 편광성분으로 분리된다. 두 편광된 빛은 공간 상에서 서로 영향을 주지 않고 계속 전파할 수 있다. 같은 공간을 전파해 SLM의 표면에 도달했을 때, 한 편광성분은 이 표면을 그대로 반사하고, 다른 편광성분은 SLM에 재생한 디지털 회절 패턴에 의해 변조된다. 이 때, 회절 패턴으로 렌즈의 역할을 할 수 있는 Fresnel zone pattern을 입력하면, 변조되는 파는 마치 렌즈를 하나 더 거쳐 곡률이 달라진 구면파가 된다. 서로 다른 곡률을 가진 두 파는 마저 전파해 두 번째 선편광판을 만나며 다시 수직, 수평 편광성분으로 나뉜다. 두 번째 편광판 뒤에 위치한 CCD 면에서 서로 일치하는 편광성분끼리 간섭이 일어나 밝기 정보가 기

록된다. 앞서 언급했듯, 이렇게 기록된 광정보는 세 가지 정보(DC, 실상, 허상)가 혼합된 것이기 때문에, 이를 분리하기 위해서는 SLM에 재생하는 회절 패턴을 일정 위상차로 변조시켜 광경로 차이를 변조시키는, phase shifting 기법을 이용해야 한다. FZP를 120도 간격으로 세 번 변조시켜가며 홀로그래픽 이미지를 취득하고, 이들을 식 2를 통해 풀어주면 최종적으로 각 물체점의 정보가 기록된 복소 홀로그램 이미지가 구해진다.

이러한 FINCH 시스템은 구성이 비교적 간단하고, 고해상도 광정보 취득이 가능하며, 하나의 광학 채널을 이용하기 때문에 외부 진동에서 비교적 자유롭다는 장점을 가지고 있다. 하지만, 시중에서 구할 수 있는 위상변조SLM이 매우 고가이기 때문에, 이를 간단한 마하-젠더 간섭계 등으로 대체할 수도 있다. 대표적으로 마하-젠더 간섭계를 이용한 <그림 8 (a)>의 시스템을 살펴보겠다. 먼저 대물렌즈와 CCD 사이에 위치한 마하-젠더 간섭계는, 곡면이 서로 다른 오목거울을 각 광학 채널에 위치시키고, 대물렌즈로부터 취득된 파면을 빔스플리터를 이용해 공간적으로 나뉜 각각의 거울로 보내준다. 거울에 의해 반사된 두 파면은 거울의 곡률 차이를 반영해 서로 곡률이 다른 파면이 되고, 빔스플리터를 거치며 다시 공간적으로 합쳐진다. CCD에 도달했을 때, 가간섭거리 내로 광경로 차이를 가지면 두 파면은 간섭이 가능하고, 이로 인한 밝기 차이가 기록된다. 최종적으로 복소 홀로그램 이미지를 얻기 위해서 두 거울 중 하나에 피에조-트랜스듀서를 설치해, 파장 보다 짧은 미세한 간격으로 거울을 움직여가며 3장의 이미지를 연달아 얻는다. 마찬가지로 식 2의 연산을 거치면 복소 홀로그램 이미지를 얻을 수 있다.

VI. 요약 및 결론

지금까지 3차원 광정보 취득 및 재생 기술에 대해 간략하게 알아보았다. 특히, 홀로그래피의 원리에 대해, 그리고 여러가지 취득 시스템 중 자가간섭 홀로그래피를 다뤘다. 안경 착용이 필요한 양안시차 방식 취득 및 재생 기술을 대체할 차세대 3차원 정보 처리 기술로, 집적영상법, 멀티뷰, 텐서 디스플레이 등을 아우르는 Light-field 기술, 그리고 RGB이미지와 더불어 계조로 깊이정보를 취득하는 방법과 이를 재생하는 적응형 디스플레이, 그리고 홀로그래피 기술이 크게 거론되고 있다. 디지털 홀로그래피는 진폭과 위상을 모두 기록하고 재생할 수 있는 기술이라는 점에서 궁극의 3차원 광정보 처리 기술로 불리지만, 핵심 소자 기술은 아직 대중의 눈을 만족시켜 줄 정도로 성숙되지 않았기 때문에, 앞서 언급한 두 기술이 요구되는 기술적 난이도와 대중의 기대 사이에서 적당한 타협점을 형성하고 있다.

디지털 홀로그래피는 의학영상정보, 미세 토모그래피(tomography) 분석 등 아직은 전문분야에서만 소규모의 기술 수요가 있지만, 소자 기술이 더욱 발전되고 무르익으면, 다른 어떤 기술보다도 더 대중의 눈을 사로잡을 것이라 여겨진다. 여러가지 디지털 홀로그래피 취득 기술이 있는 가운데, 시스템의 간결성에서 자가간섭 홀로그래피가 가지고 있는 잠재력은 매우 크다고 생각한다. 디지털 홀로그래피 연구와 그 응용에, 독자 여러분의 많은 관심을 부탁드립니다.

Acknowledgement

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학 ICT연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음" (IITP-2016-R0992-16-1008)

참고 문헌

- [1] M. S. Banks, J. C. A. Read, R. S. Allison, and S. J. Watt, "Stereoscopy and the Human Visual System," SMPTE Motion Imaging Journal, vol. 121, no. 4, pp. 24-43, 2012.
- [2] T. Shibata, J. Kim, D. M. Hoffman, and M. S. Banks, "The zone of comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays," Journal of Vision, vol. 11, no. 8, p. 11, 2011.
- [3] D. M. Hoffman, A. R. Girshick, K. Akeley, and M. S. Banks, "Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue," Journal of Vision, vol. 8, no. 3, pp. 33-33, Mar. 2008.
- [4] D. Gabor, "A new microscopic principle," Nature, 1948.
- [5] S.-W. Min, M. Hahn, J. Kim, and B. Lee, "Three-dimensional electro-floating display system using an integral imaging method," Opt. Express, vol. 13, no. 1, p. 4358, Jun. 2005.
- [6] Y. Takaki and N. Nago, "Multi-projection of lenticular displays to construct a 256-view super multi-view display," Opt. Express, vol. 18, no. 9, pp. 8824-8835, Apr. 2010.
- [7] Y. Kajiki, H. Yoshikawa, and T. Honda, "Hologramlike video images by 45-view stereoscopic display," vol. 3012, pp. 154-166, 1997.
- [8] G. Wetzstein, D. Lanman, M. Hirsch, and R.

- Raskar, "Tensor Displays: Compressive Light Field Synthesis Using Multilayer Displays with Directional Backlighting," *ACM Trans. Graph.*, vol. 31, no. 4, pp. 80:1–80:11, Jul. 2012.
- [9] S. J. Gortler, R. Grzeszczuk, R. Szeliski, and M. F. Cohen, "The Lumigraph," presented at the Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, New York, NY, USA, 1996, pp. 43–54.
- [10] R. Ng, M. Levoy, M. Brédif, G. Duval, M. Horowitz, and P. Hanrahan, "Light field photography with a hand-held plenoptic camera," *Computer Science Technical Report CSTR*, vol. 2, no. 11, pp. 1–11, 2005.
- [11] M. R. Andersen, T. Jensen, P. Lisouski, and A. K. Mortensen, *Kinect depth sensor evaluation for computer vision applications*. 2012.
- [12] S.-G. Park, J.-H. Kim, and S.-W. Min, "Polarization distributed depth map for depth-fused three-dimensional display," *Opt. Express*, vol. 19, no. 5, pp. 4316–4323, 2011.
- [13] S. Suyama, S. Ohtsuka, H. Takada, K. Uehira, and S. Sakai, "Apparent 3-D image perceived from luminance-modulated two 2-D images displayed at different depths," *Vision Research*, vol. 44, no. 8, pp. 785–793, 2004.
- [14] I. Yamaguchi and T. Zhang, "Phase-shifting digital holography," *Opt. Lett.*, vol. 22, no. 16, pp. 1268–1270, Aug. 1997.
- [15] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier optics*. Roberts and Company Publishers, 2005.
- [16] E. N. Leith and J. Upatnieks, "Reconstructed wavefronts and communication theory," *J. Opt. Soc. Am.*, *JOSA*, vol. 52, no. 10, pp. 1123–1130, 1962.
- [17] N. D. Yuri, "On the reflection of optical properties of an object in a wave field of light scattered by it," *Doklady Akademii Nauk SSSR*, vol. 144, no. 6, pp. 1275–1278, 1962.
- [18] J. Hong and M. K. Kim, "Single-shot self-interference incoherent digital holography using off-axis configuration," *Opt. Lett.*, vol. 38, no. 23, pp. 5196–5199, Dec. 2013.
- [19] J. Rosen and G. Brooker, "Digital spatially incoherent Fresnel holography," *Opt. Lett.*, vol. 32, no. 8, pp. 912–914, Apr. 2007.
- [20] B. Katz, J. Rosen, R. Kelner, and G. Brooker, "Enhanced resolution and throughput of Fresnel incoherent correlation holography (FINCH) using dual diffractive lenses on a spatial light modulator (SLM)," *Opt. Express*, vol. 20, no. 8, pp. 9109–9121, Apr. 2012.
- [21] J. Rosen and R. Kelner, "Modified Lagrange invariants and their role in determining transverse and axial imaging resolutions of self-interference incoherent holographic systems," *Opt. Express*, vol. 22, no. 23, p. 29048, 2014.
- [22] R. Kelner, B. Katz, and J. Rosen, "Optical sectioning using a digital Fresnel incoherent-holography-based confocal imaging system," *Optica*, vol. 1, no. 2, pp. 70–5, 2014.
- [23] N. Siegel and G. Brooker, "Improved axial resolution of FINCH fluorescence microscopy when combined with spinning disk confocal microscopy," *Opt. Express*, vol. 22, no. 19, pp. 22298–10, 2014.

약 력



최 기 흥

2013년 경희대학교 정보디스플레이학과 (이학학사)
2015년 경희대학교 정보디스플레이 대학원
(공학석사)
2015년~현재 경희대학교 정보디스플레이 대학원
박사과정 재학 중
관심분야: 휴먼팩터, 3차원 광정보 취득



민 성 욱

1995년 서울대학교 전기공학부 (공학학사)
1997년 서울대학교 전기공학부 (공학석사)
2004년 서울대학교 전기공학부 (공학박사)
1997년~1998년 삼성전자 주임 연구원
2005년~2007년 Virginia Tech Post doctor
2007년~현재 경희대학교 정보디스플레이학과
부교수
관심분야: 3차원 광정보 재생/취득, 광학 시스템
개발